

ОРИГИНАЛЬНЫЕ СТАТЬИ / ORIGINAL PAPERS

DOI: 10.17073/2500-0632-2019-3-202-212

Особенности механизма формирования нагрузки на систему «крепь-межрамное ограждение»

Петренко Ю. А., Касьян Н. Н., Касьяненко А. Л.

Донецкий национальный технический университет, Донецк, ✉kasyanenkoal@aol.com

Аннотация: Исследованы особенности формирования нагрузки на систему «крепь – межрамное ограждение» в процессе формирования вокруг выработки зоны разрушенных пород путем лабораторных исследований на моделях из эквивалентных материалов и структурных моделях. Выявлена роль межрамного ограждения при формировании нагрузки на рамные крепи. Установлено, что над межрамными ограждениями внутри зоны разрушенных пород образуется свод естественного равновесия, который перераспределяет нагрузку на рамы крепи, а на межрамные ограждения оказывает давление вес пород внутри этого свода. Разработаны требования к межрамным ограждениям рамных крепей горных выработок.

Ключевые слова: межрамные ограждения, затяжка, жесткость, рамная крепь, нагрузка на крепь, горное давление, эквивалентные материалы, структурные модели.

Для цитирования: Петренко Ю. А., Касьян Н. Н., Касьяненко А. Л. Особенности механизма формирования нагрузки на систему «крепь-межрамное ограждение». *Горные науки и технологии*. 2019;4(3):202-212. DOI: 10.17073/2500-0632-2019-3-202-212.

Features of Origination of Load on "Support-Interframe Shield" System

Y. A. Petrenko, N. N. Kasyan, A. L. Kasyanenko

Donetsk National Technical University, Donetsk, ✉kasyanenkoal@aol.com

Abstract: The features of originating load on “support-interframe shield” system in the process of formation of broken rock zone around a mine working were investigated by laboratory tests on models of equivalent materials and structural models. The role of interframe shield in the formation of frame support load has been revealed. It was found that a natural self-supporting arch is formed over interframe shields within the broken rock zone, which redistributes the load on the roof support frames, while the weight of rocks within the arch puts pressure on the interframe shields. The requirements for interframe shield of frame supports in mine workings have been developed.

Keywords: interframe shield, lagging, rigidity, frame support, support load, rock pressure, equivalent materials, structural models.

For citation: Petrenko Y. A., Kasyan N. N., Kasyanenko A. L. Features of origination of load on "support-interframe shield" system. *Mining Science and Technology*. 2019;4(3):202-212 (In Russ.). DOI: 10.17073/2500-0632-2019-3-202-212.

Постановка проблемы. С ростом глубины разработки одной из наиболее актуальных проблем стало поддержание горных выработок в процессе эксплуатации. Попытки обеспечить безремонтное поддержание выработок за счет увеличения несущей способности крепи положительных результатов не дали. В настоящее время удельный объем перекрепления выработок на шахтах Донбасса

достиг 7,5 м на 1 000 т добычи, а затраты труда на ремонт и поддержание выработок – 565,2 чел./см на 1 км поддерживаемых выработок в год, или около 50 чел./см на 1 000 т добычи. Стоимость же крепления одного метра выработки составляет до 50–60 % от стоимости ее проведения. Состояние выработок на шахтах Донбасса характеризуется следующими цифрами: всего деформировано



50 % выработок, в том числе подготовительных горизонтальных – 64 %, наклонных – 52 %, выработок околоствольных дворов – 43 %. Из общего объема деформированных выработок 20 % находятся в аварийном состоянии, это приводит не только к увеличению стоимости поддержания выработок, но и существенно влияет на безопасность ведения горных работ.

В связи с этим совершенствование конструкций крепи горных выработок на основе установленных особенностей механизма формирования нагрузки на них является актуальной задачей.

Результаты анализа последних исследований и публикаций. Механизм взаимодействий рамной крепи выработок с окружающим горным массивом является весьма сложным и неоднозначным. Существующее представление о том, что отпор крепи распределяется по внутренней поверхности выработки на ширину, равную шагу установки крепи, не отражает фактически наблюдаемую ситуацию в шахтных условиях, особенно при образовании зоны разрушенных пород. Практически отпор массиву крепью осуществляется только по поверхности контакта между ними. В межрамном пространстве величина отпора массиву определяется шагом установки крепи и жесткостью межрамного ограждения. При этом несущим элементом, оказывающим сопротивление смещающимся породам, являются только рамы крепи.

Характер распределения нагрузки по периметру рамной крепи в настоящее время изучен достаточно глубоко [1–7]. Вместе с тем крепь представляет собой пространственную конструкцию, и вопрос о механизме взаимодействия рамной крепи с вмещающим породным массивом с учетом влияния на него характера деформирования пород в межрамном пространстве до настоящего момента полностью не изучен. Большинство исследователей затяжка (межрамное ограждение) рассматривается как элемент крепи, предназначенный для защиты выработки от вывалов

породы в промежутках между рамами крепи [8–16]. Вместе с тем результаты обследования горных выработок показывают, что состояние затяжки намного хуже состояния непосредственно рам крепи [17–20]. Поэтому в последние годы большее внимание стали уделять и грузонесущей функции затяжки, которая заключается в восприятии давления со стороны массива горных пород и передачи его на рамы крепи [21–25]. При этом большинство разработанных шахтных затяжек представляют собой жесткие конструкции, несущая способность которых приближается к несущей способности крепежных рам. Это приводит к увеличению материалоемкости и трудоемкости крепления выработок. Такой подход к решению проблемы межрамных ограждений не отражает реального механизма работы рамной податливой крепи.

Цель работы. Установить особенности формирования нагрузки на систему «крепь – межрамное ограждение» в процессе формирования вокруг выработки зоны разрушенных пород с учетом взаимодействия рам крепи с породным массивом.

Результаты исследований. Для достижения поставленной цели в работе использовался метод физического моделирования на моделях из эквивалентных материалов и структурных моделях. Решение осуществлялось в несколько этапов.

1. Установить влияние режима работы затяжки (жесткой или податливой) и плотности крепления на величину и характер нагружения рам крепи.

2. Установить особенности механизма нагружения рам крепи и затяжки при податливом режиме ее работы.

3. Обосновать требования к параметрам податливой затяжки.

Нагрузка модели осуществлялась при помощи пневмобаллонов. В качестве эквивалентного материала при моделировании использовались гипсопесчаные смеси.

При отработке структурных моделей в качестве материала моделей использовалась

мраморная крошка с размером частиц до 10 мм.

Моделировался слоистый горный массив с прочностью пород на одноосное сжатие 40–60 МПа. В моделях рамы крепи по длине выработки устанавливались с шагом 60; 40; 20 и 13 мм, что соответствует 1,5; 1,0; 0,5 и 0,33 м в натуре. Для изучения характера распределения напряжений в массиве горных пород в моделях на расстоянии 30 и 70 мм от контура выработки всплошную устанавливались датчики трения. Аналогичные датчики устанавливались и под рамы крепи.

Схема расположения датчиков приведена на рис. 1. Перед отработкой моделей снимались показания датчиков при отсутствии внешней нагрузки. В дальнейшем в процессе отработки моделей снимались показания датчиков при изменении величины внешней нагрузки.

Вначале была отработана модель № 1 с жесткой затяжкой. Результаты измерений давления на рамы крепи и напряжений в окружающем массиве представлены на рис. 2, 3. Анализ результатов измерения давления на рамы крепи (см. рис. 2) показы-

вает, что с увеличением плотности установки крепи нагрузка на раму уменьшается. При этом показания датчиков под рамами № 1 и 12 не учитывались, так как они располагались вплотную к телу модели.

Так, с уменьшением шага установки крепи с 1,5 до 0,33 м нагрузка на раму уменьшается с 121 до 42 кПа. Это подтверждает правильность существующего мнения о том, что участие жесткой затяжки в формировании нагрузки на крепь сводится только к ее перераспределению на рамы в зависимости от шага их установки.

Анализ графиков характера распределения давления в массиве модели (см. рис. 3) показывает, что он также зависит от плотности установки рам крепи. Так, при шаге установки крепи 1,5–0,5 м непосредственно над рамами наблюдается максимальное давление, при этом с уменьшением шага крепи разница между давлением над рамами крепи и между ними снижается. При шаге менее 0,5 м давление в массиве распределяется более равномерно. Такая же закономерность наблюдается и при большем удалении от контура выработки.

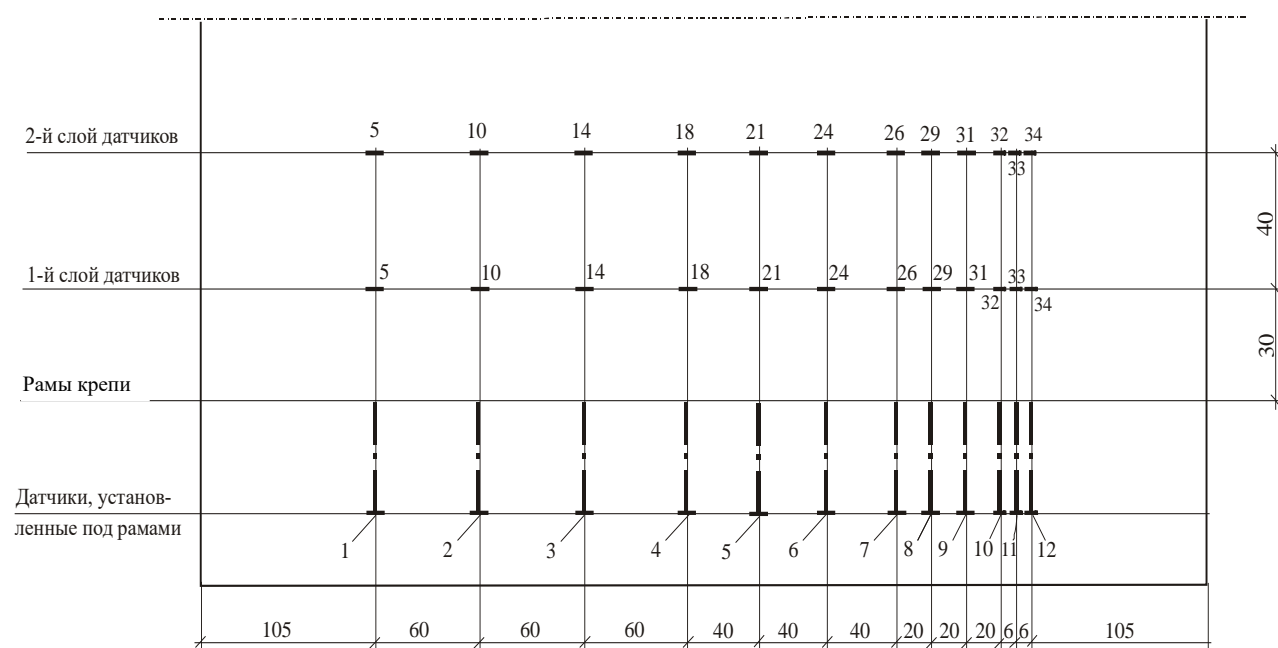


Рис. 1. Схема расположения датчиков давления в модели

Fig. 1. Layout of pressure sensors in the model

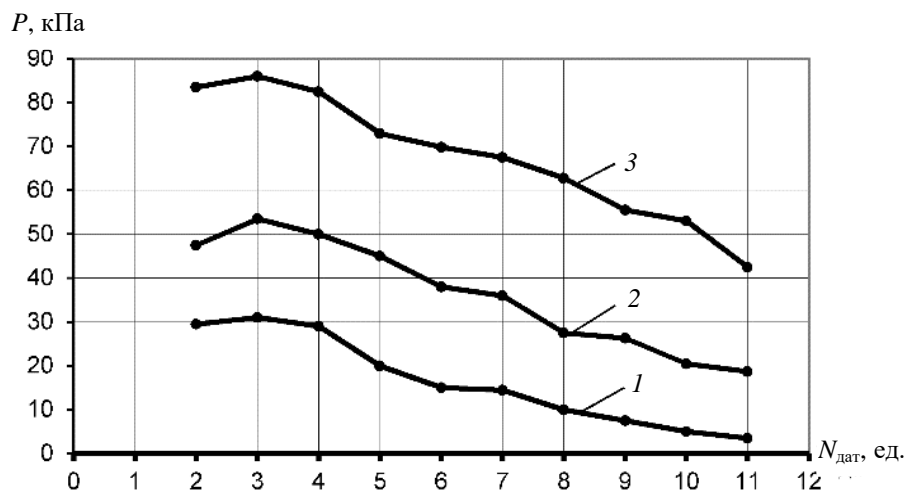


Рис. 2. Результаты измерения давления на рамы крепи (P) при жесткой затяжке и величине внешней нагрузки 0 кПа (1), 20 кПа (2) и 40 кПа (3)

Fig. 2. Results of measuring pressure on support frames (P) with rigid lagging at external load of 0 кПа (1), 20 кПа (2) and 40 кПа (3)

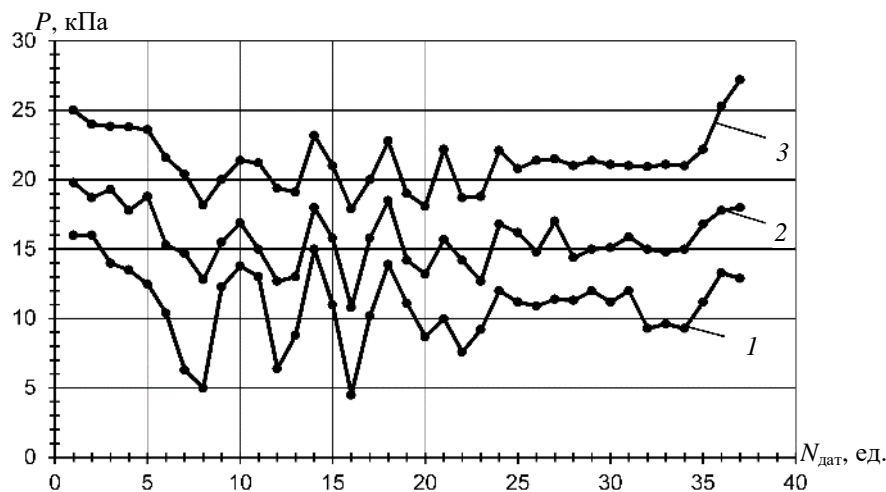


Рис. 3. Результаты измерения давления (P) на датчики первого слоя в модели с жесткой затяжкой при величине нагрузки 0 кПа (1), 20 кПа (2) и 40 кПа (3)

Fig. 3. Results of measuring pressure on the first layer sensors in the model with rigid lagging at external load of 0 кПа (1), 20 кПа (2) and 40 кПа (3)

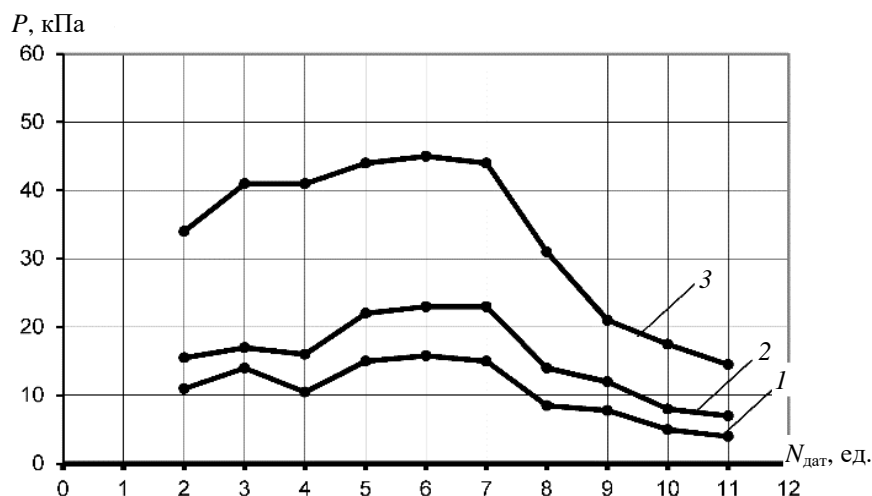


Рис. 4. Результаты измерения давления на рамы крепи (P) с податливой затяжкой при величине нагрузки 0 кПа (1), 20 кПа (2) и 40 кПа (3)

Fig. 4. Results of measuring pressure on support frames (P) with adjustable lagging at external load of 0 кПа (1), 20 кПа (2) and 40 кПа (3)

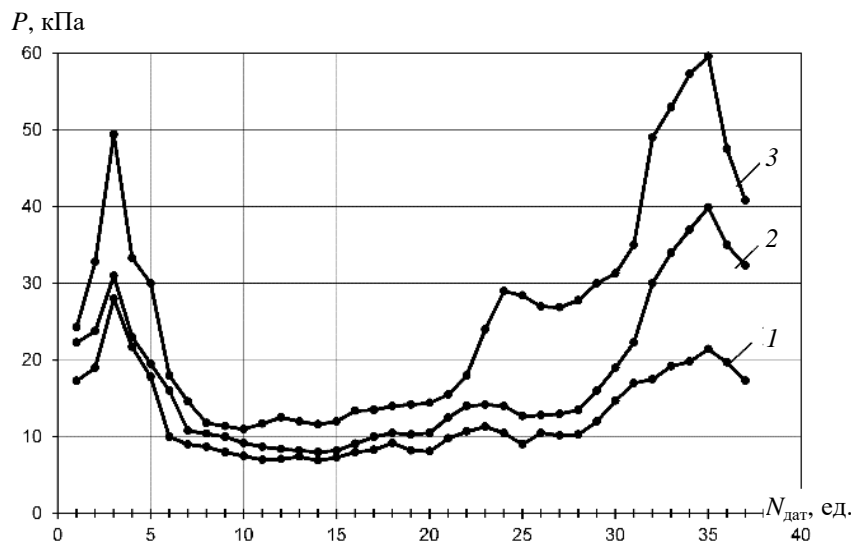


Рис. 5. Результаты измерения давления (P) на датчики первого слоя в модели с податливой затяжкой при величине нагрузки 0 кПа (1), 20 кПа (2) и 40 кПа (3)

Fig. 5. Results of measuring pressure on the first layer sensors in the model with adjustable lagging at external load of 0 kPa (1), 20 kPa (2) and 40 kPa (3)

Очевидно, что рамы крепи выступают в роли концентраторов давления, так как их несущая способность и жесткость значительно больше, чем у затяжки. Вследствие этого массив непосредственно над рамами разрушается сильнее. При шаге крепи менее 0,5 м несущая способность и жесткость крепления по длине выработки практически одинаковы и давление распределяется более равномерно по длине выработки. Следовательно, увеличение жесткости затяжки приведет к более интенсивному разрушению пород между рамами.

Модель № 2 была отработана для аналогичных условий, но с податливой затяжкой. Результаты измерений давления на рамы крепи и напряжений в окружающем массиве представлены на рис. 4, 5. Как видно из приведенных данных, нагрузка на рамы крепи при шаге их установки от 0,5 м до 1,5 м распределяется равномерно и практически не зависит от расстояния между рамами. При шаге установки крепи 0,5 м и менее нагрузка на рамы распределяется аналогично, как и при жесткой затяжке, т.е. с уменьшением расстояния между рамами нагрузка уменьшается.

Распределение давлений в глубине массива носит равномерный характер при шаге крепи 0,5–1,5 м, при этом концентрации давления над рамами крепи не наблюдается. При шаге крепи менее 0,5 м давление в глубине массива распределяется аналогично, как и при жесткой затяжке.

Проведенные исследования позволяют сделать вывод, что при шаге установки рам крепи более 0,5 м затяжка не только ограждает выработку от возможных обрушений, но и участвует в процессе формирования нагрузки на рамы крепи. При этом чем больше податливость затяжки, тем более равномерно распределяется давление на рамы и в глубине массива по длине выработки.

При шаге установки крепи менее 0,5 м роль затяжки сводится только к удержанию забутовочного материала.

Для более детального изучения механизма формирования нагрузки на рамы крепи были отработаны модели № 3, 4, 5. Для моделирования зоны разрушенных пород (ЗРП) в качестве материала модели использовалась мраморная крошка с крупностью частиц до 10 мм. В модели рамы крепи по длине выработки устанавливались через 40 мм, что соответственно шагу крепи в натуре 1,0 м. Под

каждой рамой крепи устанавливался датчик трения. Между рамами крепи 1–4 устанавливалась податливая затяжка, а между рамами 4–7 – жесткая. В моделях № 3, 4 и 5 имитировалась величина зоны разрушенных пород над выработкой, равная соответственно половине шага установки крепи, шагу установки крепи и двум шагам установки крепи.

Результаты измерений давлений на рамы крепи в моделях 3, 4 и 5 представлены соответственно на рис. 6, 7.

Анализ полученных данных показал, что в начальной стадии формирования зоны разрушенных пород (при величине внешней нагрузки 0...10 кПа), податливость затяжки не оказывает существенного влияния на величину нагрузки на крепь. Начиная с величины внешней нагрузки в 10 кПа нагрузка на рамы с податливой затяжкой растет менее интенсивно и по величине в 1,5...2,5 раза

меньше, чем на рамы с жесткой затяжкой. При увеличении внешней нагрузки более 30 кПа интенсивность нагружения рам с податливой затяжкой возрастает, а с жесткой – уменьшается. Но в целом нагрузка на рамы с податливой затяжкой, как и было установлено ранее, на 30...40 % меньше, чем на рамы с жесткой затяжкой.

Такой механизм формирования нагрузки на рамы крепи можно объяснить следующим. Начиная с величины внешней нагрузки в 10 кПа податливая затяжка прогибается и при размере зоны разрушенных пород над выработкой более половины шага крепи между рамами образуется свод естественного равновесия. Свод полностью формируется при величине внешней нагрузки 30 кПа (рис. 8). После этого нагрузка на рамы крепи начинает возрастать с увеличением внешней нагрузки более интенсивно.

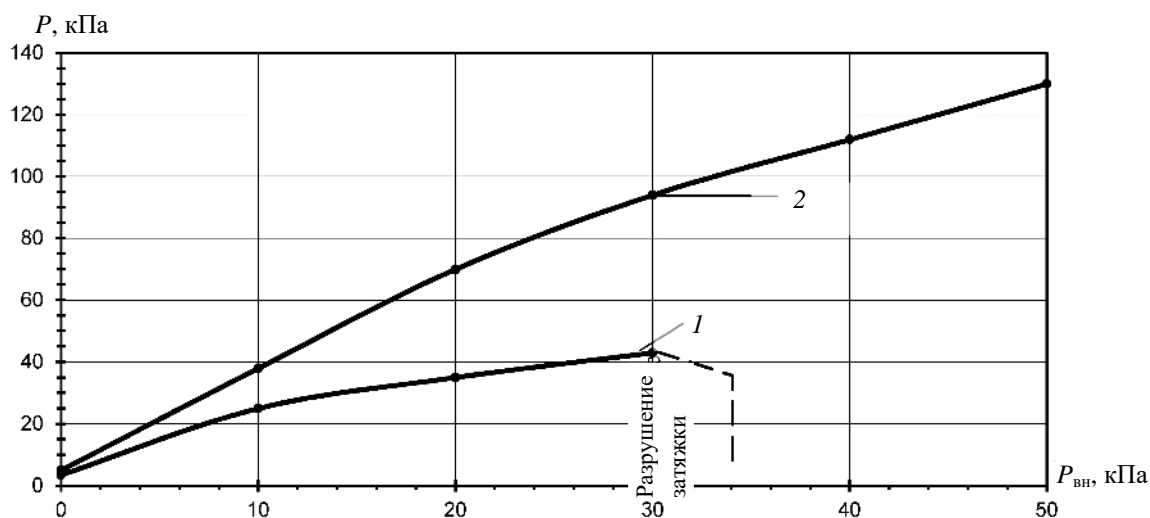


Рис. 6. Результаты измерения давления на рамы крепи (P) в модели № 3 в зависимости от величины внешней нагрузки ($P_{вн}$):

1 – при податливой затяжке; 2 – при жесткой затяжке

Fig. 6. Results of measuring pressure on support frames (P) in model No. 3 depending on external load (P_{ext}):

1 – with adjustable lagging; 2 – with rigid lagging

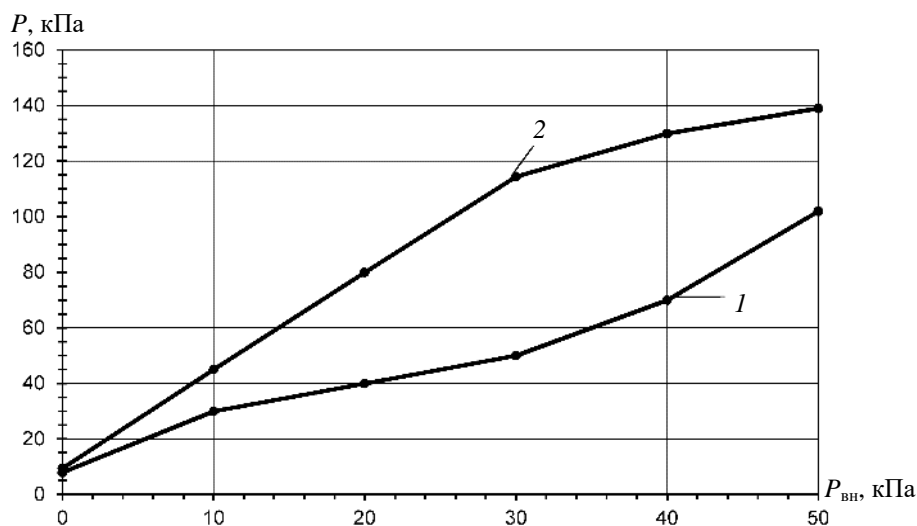


Рис. 7. Результаты измерения давления на рамы крепи (P) в модели № 4, 5 в зависимости от величины внешней нагрузки ($P_{\text{вн}}$):

1 – при податливой затяжке; 2 – при жесткой затяжке

Fig. 7. Results of measuring pressure on support frames (P) in models Nos. 4, 5 depending on external load (P_{ext}):

1 – with adjustable lagging; 2 – with rigid lagging

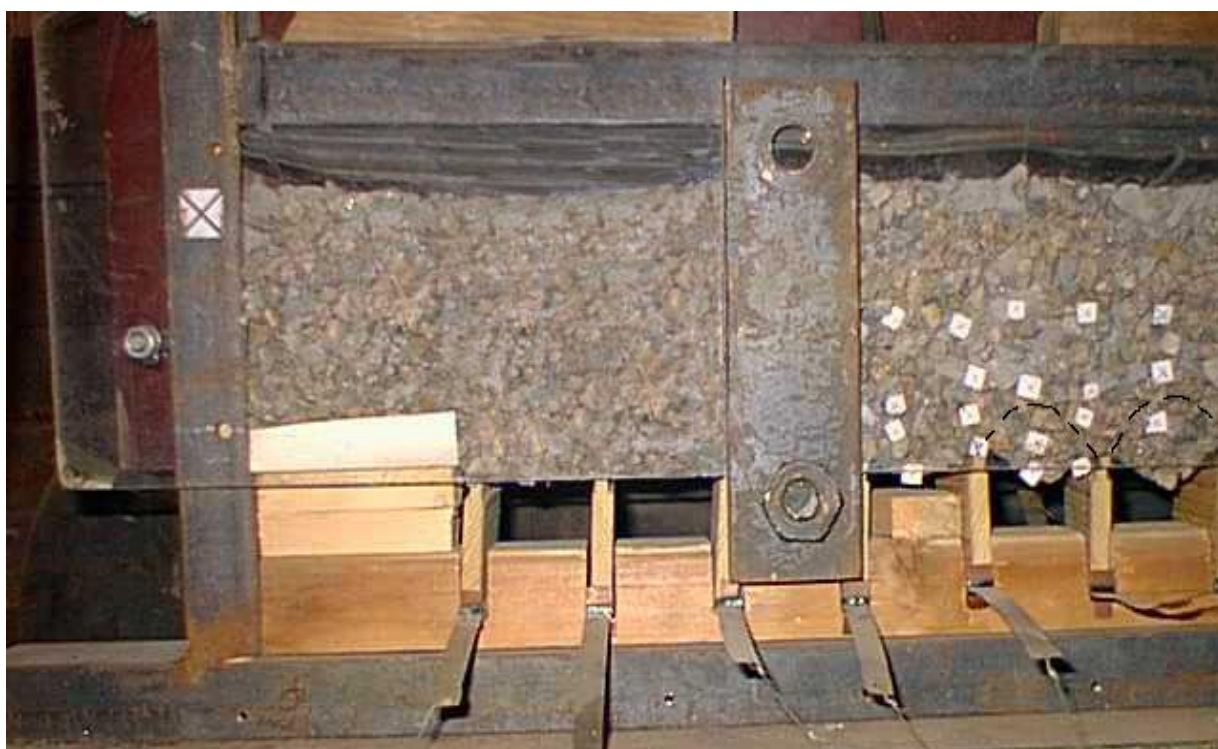


Рис. 8. Состояние модели с жесткой и податливой затяжкой

Fig. 8. Behavior of model with rigid and adjustable lagging

Нагрузка на рамы с жесткой затяжкой с увеличением величины внешней нагрузки возрастает практически по линейной зависимости, так как затяжка только перераспределяет нагрузку на рамы. Однако при внешней нагрузке более 30 кПа затяжка прогибается и воспринимает часть смещений контура выра-

ботки и тем самым снижает нагрузку на рамы. После завершения образования в межрамном пространстве сводов естественного равновесия затяжка воспринимает нагрузку только от веса породы внутри этого свода. А так как эти своды опираются на рамы крепи, то при дальнейшем росте зоны разрушен-

ных пород вокруг выработки нагрузка ими перераспределяется только на рамы крепи и не передается на затяжку.

Выполненные исследования позволяют уточнить механизм формирования нагрузки на систему «крепь – межрамное ограждение» в процессе образования вокруг выработки зоны разрушенных пород, который заключается в следующем.

В начальный период формирования вокруг выработки ЗРП (размер ЗРП не превышает шага установки крепи) и при отсутствии деформации затяжки последняя только перераспределяет нагрузку от смещений контура выработки на рамы крепи, не оказывая существенного влияния на ее величину. При дальнейшем росте ЗРП вглубь массива и прогибе затяжки вследствие смещений пород в полость выработки, так как ее жесткость и несущая способность меньше, чем у рамы крепи, между рамами вдоль продольной оси выработки начинают образовываться своды естественного равновесия.

Образование свода естественного равновесия между рамами крепи вдоль выработки позволяет объяснить тот факт, что в шахтных условиях, даже при значительных деформациях податливой крепи с железобетонной затяжкой, не наблюдается полного разрушения затяжки и обрушения пород между рамами крепи. При этом несущая способность затяжки значительно меньше, чем рамы крепи.

Установленный механизм позволяет сформировать требования к параметрам межрамного ограждения:

- податливость затяжки должна обеспечивать возможность образования сводов естественного равновесия внутри ЗРП в межрамном пространстве без ее разрушения;
- несущая способность затяжки должна приниматься такой, чтобы воспринимать нагрузку от веса пород в пределах свода естественного равновесия.

Выводы и перспективы дальнейших исследований. Обобщая результаты проведенных исследований, можно отметить следующее:

- затяжка, как жесткая, так и податливая, участвует в процессе формирования нагрузки на крепь при шаге установки рам крепи 0,5 м и более. При шаге установки рам крепи менее 0,5 м роль затяжки сводится только к удержанию забутовочного материала;

- при жесткой затяжке нагрузка на рамы крепи уменьшается с увеличением плотности установки рам, т.е. жесткая затяжка только перераспределяет нагрузку от смещений контура на рамы крепи. При этом над рамами наблюдается концентрация давления и более интенсивное разрушение массива;

- при податливой затяжке нагрузка на рамы крепи при шаге их установки более 0,5 м и давление в глубине массива распределяются равномерно и существенно не зависят от расстояния между рамами. При шаге установки рам крепи менее 0,5 м нагрузка на рамы и давление в глубине массива распределяются аналогично, как и при жесткой затяжке;

- при податливой затяжке по мере роста зоны разрушенных пород вокруг выработки вглубь массива и прогиба затяжки между рамами крепи вдоль выработки образуется свод естественного равновесия. При этом после завершения формирования свода естественного равновесия нагрузка на рамы крепи с увеличением внешнего давления возрастает более интенсивно;

- при податливой затяжке и шаге установки рам крепи более 0,5 м нагрузка на рамы на 30...40 % меньше, чем при жесткой затяжке.

Задачей дальнейших исследований является разработка методики расчета параметров межрамных ограждений.

Библиографический список

1. Литвинский Г. Г. Закономерности формирования нагрузки на крепи горных выработок // Сб. науч. тр. ДонГТУ. 2016. № 3 (46). С. 5–15.
2. Петренко Ю. А., Новиков А. О., Подкопаев С. В., Александров С. Н. Об особенностях формирования нагрузки на крепь выработок глубоких шахт. Физико-технические проблемы горного производства. 2011. Вып. 14. С. 133–141.
3. Li C. Rock support design based on the concept of pressure arch // International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences. 2006. Vol. 43(7). Pp. 1083–1090. doi: 10.1016/j.ijrmms.2006.02.007.
4. Дрибан В. А., Новиков А. О. О механизме потери устойчивости горных выработок и способах управления состоянием вмещающего их массива // Наукові праці УкрНДМІ НАН України. 2012. № 11. С. 275–292.
5. Kong X., Liu Q., Pan Y., Liu J. Stress redistribution and formation of the pressure arch above underground excavation in rock mass // European Journal of Environmental and Civil Engineering. 2017. doi: 10.1080/19648189.2018.1541824.
6. Huang X., Zhang Z. Stress arch bunch and its formation mechanism in blocky stratified rock masses. Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering. 2012. Vol. 4. No. 1. Pp. 19–27. doi: 10.3724/SP.J.1235.2012.00019.
7. Касьян Н. Н., Новиков А. О., Петренко Ю. А., Шестопапов И. Н., Резник А. В. Металлическая податливая крепь. Патент Украина, № a201102997, 2013.
8. Скобенко А. В., Хозяйкина Н. В., Дерыш В. В. Совершенствование рамной крепи протяженных выработок угольных шахт. Днепропетровск: НГУ, 2014. 96 с.
9. Lisjak A., Grasselli G. A review of discrete modeling techniques for fracturing processes in discontinuous rock masses. Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering. 2014. Vol. 6. No. 4. Pp. 301–314. doi: 10.1016/j.jrmge.2013.12.007.
10. Мещанинов С. К. Методы моделирования и управления надежностью функционирования горных выработок. Днепропетровск: НГУ, 2011. 360 с.
11. Alshkane Y. M., Marshall A. M., Stace L. R. Prediction of strength and deformability of an interlocked blocky rock mass using UDEC // Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering. 2017. Vol. 9. No. 3. Pp. 531–542. doi: 10.1016/j.jrmge.2017.01.002.
12. Bidgoli M. N., Zhao Z., Jing L. Numerical evaluation of strength and deformability of fractured rocks. Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering. 2013. Vol. 5. No. 6. Pp. 419–430. doi: 10.1016/j.jrmge.2013.09.002.
13. Kazerani T. Effect of micromechanical parameters of microstructure on compressive and tensile failure process of rock // International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences. 2013 Vol. 64. Pp. 44–55. doi: 10.1016/j.ijrmms.2013.08.016.
14. Khani A., Baghbanan A., Norouzi S., Hashemolhosseini H. Effects of fracture geometry and stress on the strength of a fractured rock mass // International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences. 2013. Vol. 60. Pp. 345–352. doi: 10.1016/j.ijrmms.2013.01.011.
15. Wang X., Zhao Y., Lin X. Determination of mechanical parameters for jointed rock masses. Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering. 2011. Vol. 3, sup. 1. Pp. 398–406. doi: 10.3724/SP.J.1235.2011.00398.
16. Макшанкин Д. Н. Обоснование крепления горных выработок металлической крепью из шахтного профиля. Автореф. дис. ... канд. техн. наук. Кемерово, 2012. 19 с.
17. Демин В. Ф., Демина Т. В., Алиев С. Б., Разумняк Н. Л. Исследование проявлений горного давления и характера взаимодействия различных видов крепления с вмещающими породами вокруг выработки. Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2012. Отд. вып. № 7. С. 34–43.
18. Zhang L. Evaluation of rock mass deformability using empirical methods // Underground Space. 2017. Vol. 2. No. 1. Pp. 1–15. doi: 10.1016/j.undsp.2017.03.003.
19. Литвинский Г. Г., Смекалин Е. С. Эффективность рамных конструкций крепи // Сб. науч. тр. ДонГТУ. 2015. № 1 (44). С. 18–25.
20. Кошелев К. В., Петренко Ю. А., Новиков А. О. Охрана и ремонт горных выработок. М.: Недра, 1990. 218 с.
21. Петренко Ю. А. Геомеханические основы сохранения устойчивости выработок глубоких шахт на различных этапах их эксплуатации. Автореф. дис. ... д-ра техн. наук. Донецк, 2008. 30 с.
22. Bidgoli M. N., Jing L. Anisotropy of strength and deformability of fractured rocks // Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering. 2014. Vol. 6. No. 2. Pp. 156–164. doi: 10.1016/j.jrmge.2014.01.009.

23. Saeidi O., Rasouli V., Vaneghi R.G., Gholami R., Torabi S.R. A modified failure criterion for transversely isotropic rocks // *Geoscience Frontiers*. 2013. Vol. 5. No. 2. Pp. 215–225. doi: 10.1016/j.gsf.2013.05.005.
24. Ciz R., Siggins A.F., Gurevich B., Dvorkin J. Influence of microheterogeneity on effective stress law for elastic properties of rocks // *Geophysics*. 2008. Vol. 73 (1). Pp. E7–E14. doi: 10.1190/1.2816667.
25. Li Q., Shi W., Yang R. Deformation mechanisms in a coal mine roadway in extremely swelling soft rock // *SpringerPlus*. 2016. Vol. 5(1). 1310. doi: 10.1186/s40064-016-2942-6.

References

1. Litvinsky G. G. Patterns of load formation on mine working support // *Proceedings of DonSTU*, 2016, No. 3 (46), pp. 5-15 (in Russ.).
2. Petrenko Yu. A., Novikov A. O., Podkopaev S. V., Aleksandrov S. N. About the features of load formation on working support in deep mines. Physical and technical problems of mining, 2011, Issue 14, pp. 133–141 (in Russ.).
3. Li C. Rock support design based on the concept of pressure arch // *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*. 2006, Vol. 43(7), pp. 1083–1090. doi: 10.1016/j.ijrmms.2006.02.007.
4. Driban V. A., Novikov A. O. On the mechanism of mine working stability loss and methods for control of the host rock mass conditions // *Proceedings of UkrNDMI of NAS of Ukraine*, 2012, No. 11, pp. 275–292 (in Russ.).
5. Kong X., Liu Q., Pan Y., Liu J. Stress redistribution and formation of the pressure arch above underground excavation in rock mass // *European Journal of Environmental and Civil Engineering*. 2017. doi: 10.1080/19648189.2018.1541824.
6. Huang X., Zhang Z. Stress arch bunch and its formation mechanism in blocky stratified rock masses. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*. 2012, Vol. 4, No. 1, pp. 19-27. doi: 10.3724/SP.J.1235.2012.00019.
7. Kasyan N. N., Novikov A. O., Petrenko Yu. A., Shestopalov I. N., Reznik A. V. Metal yielding support. Patent of Ukraine, No. a201102997, 2013 (in Russ.).
8. Skobenko A. V., Khozyadkina N. V., Derysh V. V. Improving frame support of coal mine longwalls (*Sovershenstvovanie ramnoy krepki protyazhennykh vyrabotok ugol'nykh shakht*). Dnepropetrovsk: NSU Publ., 2014, 96 p. (in Russ.).
9. Lisjak A., Grasselli G. A review of discrete modeling techniques for fracturing processes in discontinuous rock masses. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*. 2014, Vol. 6, No. 4, pp. 301–314. doi: 10.1016/j.jrmge.2013.12.007.
10. Meshchaninov S. K. Methods of modeling and control of mining working operation reliability (*Metody modelirovaniya i upravleniya nadezhnost'yu funktsionirovaniya gornyx vyrabotok*). Dnepropetrovsk: NSU Publ., 2011, 360 p. (in Russ.).
11. Alshkane Y. M., Marshall A. M., Stace L. R. Prediction of strength and deformability of an interlocked blocky rock mass using UDEC // *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*. 2017, Vol. 9, No. 3, pp. 531–42. doi: 10.1016/j.jrmge.2017.01.002.
12. Bidgoli M. N., Zhao Z., Jing L. Numerical evaluation of strength and deformability of fractured rocks. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*. 2013, Vol. 5, No. 6, pp. 419–430. doi: 10.1016/j.jrmge.2013.09.002.
13. Kazerani T. Effect of micromechanical parameters of microstructure on compressive and tensile failure process of rock // *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*. 2013 Vol. 64, pp. 44–55. doi: 10.1016/j.ijrmms.2013.08.016.
14. Khani A., Baghbanan A., Norouzi S., Hashemolhosseini H. Effects of fracture geometry and stress on the strength of a fractured rock mass // *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*. 2013, Vol. 60, pp. 345–352. doi: 10.1016/j.ijrmms.2013.01.011.
15. Wang X., Zhao Y., Lin X. Determination of mechanical parameters for jointed rock masses. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*. 2011, Vol. 3, sup. 1, pp. 398–406. doi: 10.3724/SP.J.1235.2011.00398.
16. Makshankin D. N. Substantiation for steel section support application for mine workings. Extended abstract of Cand. Sci. Dissertation in engineering science, Kemerovo, 2012, 19 p. (in Russ.).
17. Demin V. F., Demina T. V., Aliev S. B., Razumnyak N. L. Investigation of rock pressure manifestations and nature of the interaction of various types of support with host rocks around mine workings. *Mining Information and Analytical Bulletin (Gornyy Informatsionno-Analiticheskiy Byulleten)* (scientific and technical journal), 2012, special issue No. 7, pp. 34–43 (in Russ.).

18. Zhang L. Evaluation of rock mass deformability using empirical methods // *Underground Space*. 2017, Vol. 2, No. 1, pp. 1–15. doi: 10.1016/j.undsp.2017.03.003.
19. Litvinsky G. G., Smekalin E. S. Effectiveness of frame support design // *Proceedings of DonSTU*, 2015, No. 1 (44), pp. 18–25 (in Russ.).
20. Koshelev K. V., Petrenko Yu. A., Novikov A. O. Protection and repair of mine workings (*Okhrana i remont gornykh vyrabotok*). Moscow: Nedra Publ., 1990, 218 p. (in Russ.).
21. Petrenko Yu. A. Geotechnical basis for maintaining stability of deep mine workings at various stages of their operation. Extended abstract of Doct. Sci. Dissertation in engineering science, Donetsk, 2008, 30 p. (in Russ.).
22. Bidgoli M. N., Jing L. Anisotropy of strength and deformability of fractured rocks // *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*. 2014, Vol. 6, No. 2, pp. 156–164. doi: 10.1016/j.jrmge.2014.01.009.
23. Saeidi O., Rasouli V., Vaneghi R. G., Gholami R., Torabi S. R. A modified failure criterion for transversely isotropic rocks // *Geoscience Frontiers*. 2013, Vol. 5, No. 2, pp. 215–225. doi: 10.1016/j.gsf.2013.05.005.
24. Ciz R., Siggins A. F., Gurevich B., Dvorkin J. Influence of microheterogeneity on effective stress law for elastic properties of rocks // *Geophysics*. 2008, Vol. 73 (1), pp. E7–E14. doi: 10.1190/1.2816667.
25. Li Q., Shi W., Yang R. Deformation mechanisms in a coal mine roadway in extremely swelling soft rock // *SpringerPlus*. 2016, Vol. 5(1). 1310. doi: 10.1186/s40064-016-2942-6.